

# Medición de la base de tiempo del cronómetro digital por el método de inducción

Henry Diaz\*, Luis Palma<sup>†</sup>

\*Responsable del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del Instituto Nacional de Calidad (INACAL),  
Lima - Perú [hdiaz@inacal.gob.pe](mailto:hdiaz@inacal.gob.pe)

<sup>†</sup>Responsable Alternativo del Laboratorio de Tiempo y Frecuencia del Instituto Nacional de Calidad (INACAL),  
Lima - Perú [lpalma@inacal.gob.pe](mailto:lpalma@inacal.gob.pe)

**Resumen** — En este trabajo se describe un sistema detector de frecuencia para medir directamente la base de tiempo del cronómetro por el método de inducción y de esta forma realizar la calibración de cronómetros digitales con una incertidumbre de medición  $\leq 0,1 \mu\text{s/s}$ .

**Palabras claves** — Sistema detector de frecuencia; método de inducción; calibración de cronómetros digitales.

## I. INTRODUCCIÓN

En el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia de INACAL (antes SNM-INDECOPI) se viene realizando la calibración de cronómetros digitales por el método de inducción [2], el cual se basa en el método de base de tiempo [1]. Este método se realiza con algunas variantes, no midiendo directamente la frecuencia fundamental del oscilador de cuarzo del cronómetro de 32 768 Hz sino midiendo un submúltiplo de esta frecuencia (28,444 Hz; 32 Hz; 42,666 Hz u otro valor que resulte de la división de 32 768 Hz), para lo cual se desarrolló un sistema detector de frecuencias para capturar y medir la frecuencia de la pantalla de refresco del LCD del cronómetro [2], debido a que la amplitud de esta señal facilita su captura y medición.

Este sistema desarrollado trabaja de manera adecuada pero no para todos los cronómetros debido a que alrededor del 10% de los cronómetros que se calibran en el país, según el tipo de construcción, emiten una señal con una amplitud muy baja, lo cual dificulta su captura y medición. Por otro lado el Instituto Nacional de Metrología (INM) de Costa Rica desarrolló un sistema para medir directamente la base de tiempo del

cronómetro [3], pero con el inconveniente de que en ocasiones deben abrir el cronómetro para aumentar la amplitud de la señal a capturar. Por estos motivos era necesario desarrollar un nuevo sistema que mejore la amplificación de la señal que se desea capturar sin necesidad de abrir el cronómetro.

Por lo indicado se consideró conveniente desarrollar un sistema detector de frecuencia para medir directamente la frecuencia fundamental del oscilador de cuarzo del cronómetro por el método de inducción, sin necesidad de abrir el cronómetro, obteniendo el error en la medición del tiempo del cronómetro con una incertidumbre de medición  $\leq 0,1 \mu\text{s/s}$ .

## II. DETECCIÓN DE LA SEÑAL

El método de inducción consiste en inducir una corriente en las superficies conductoras de un condensador de placas paralelas causado por la variación del campo eléctrico que genera el oscilador de cuarzo del cronómetro, obteniéndose una señal que se repite periódicamente, esta señal periódica corresponde justamente a la frecuencia inducida del cronómetro. Para capturar esta señal se desarrolló un sistema detector de frecuencia (ver Figura 1), cuyas etapas se describen a continuación.

Por medio de un osciloscopio se puede observar las señales que son capturadas por el condensador de placas paralelas con una amplitud de alrededor de 0,4 mV. Debido a que la señal de interés de 32 768 Hz es muy pequeña y ésta se confunde con el nivel de ruido presente es necesario realizar una primera amplificación (preamplificación) para su estudio.

Para desarrollar el sistema se utiliza el amplificador AD620. Esta etapa se ha diseñado para obtener una ganancia máxima de 1000. Debido a que el amplificador disminuye su ancho de banda a medida que aumenta la ganancia esta etapa se dividió en dos sub etapas, una etapa con un preamplificador 1 de ganancia fija de 10 y otra etapa con un preamplificador 2 de ganancia variable de hasta 100, de esta forma se mantiene el ancho de banda del amplificador hasta 100 kHz. El preamplificador 1 se colocó junto con el condensador de placas paralelas para obtener la diferencia de tensión generada por la corriente inducida en éstas y enviar una señal estable al preamplificador 2. Con el preamplificador 2 se obtiene la señal de interés con una amplitud de alrededor de 120 mV, de tal manera que es posible estudiarla y tratarla.

Para minimizar las perturbaciones externas y evitar que éstas se mezclen con la señal de interés se utiliza un sistema de blindaje por medio de dos cajas metálicas de tal manera que en la caja metálica 1 se coloca el cronómetro con el condensador de placas paralelas y el preamplificador 1, y en la caja metálica 2 se coloca el preamplificador 2 y las demás etapas del sistema (ver Figura 1). Por medio de un osciloscopio se observa la señal preamplificada la cual contiene picos de tensión presentes que corresponden a la frecuencia de refresco de la pantalla LCD del cronómetro con una amplitud de alrededor de 6 V.

Con la red o filtro Snubber, la cual está compuesta por una resistencia y un capacitor conectados en serie, se atenúan los picos de tensión presentes de la señal preamplificada. La atenuación se realiza de alrededor del 30% del valor del pico de tensión, de tal forma que el tiempo de descarga del capacitor sea el menor posible.

Se utiliza un amplificador TL072 en configuración no inversor, el cual mantiene la polaridad de la señal con ganancia regulable hasta 100. Para tratar la señal de interés, la ganancia del amplificador es regulada hasta obtener una señal con una amplitud alrededor de 0,5 V. Con ayuda de un osciloscopio es posible observar la señal de interés amplificada con picos de tensión que corresponden a señales con frecuencias no deseadas.

Con el limitador de tensión, el cual está compuesto por dos diodos colocados en forma antiparalela, se limitan estos picos de tensión permitiendo el pase de señales con una amplitud menor a 0,6 V. Se elige este valor de amplitud debido a que la tensión de polarización directa de un diodo es alrededor de este valor permitiéndonos obtener una señal que no cuenta con picos de tensión.

Con el filtro pasabanda de banda angosta se permite el paso de señales con frecuencias que se encuentren en el límite de frecuencia de corte inferior y superior eliminando las señales con frecuencias que se encuentran fuera de este límite. Esta

etapa se subdividió en dos etapas, una etapa con un filtro pasabanda 1 y otra etapa con un filtro pasabanda 2, ambos de las mismas características, de esta forma se aumenta la atenuación de las señales con frecuencias no deseadas con un factor de calidad alto manteniendo la estabilidad del filtro. Para el diseño de esta etapa se consideró un ancho de banda del filtro de 500 Hz y una frecuencia central de 32 768 Hz.

Por último se utiliza un lazo de seguimiento de fase o PLL NE567, el cual se engancha a la frecuencia de la señal de interés aún si ésta presenta discontinuidad por un periodo corto de tiempo. Finalmente con el PLL se obtiene la frecuencia fundamental del cronómetro de 32 768 Hz de manera estable en forma de onda cuadrada.

En la Figura 1 se muestra el diagrama del sistema de detector de frecuencia para medir directamente la frecuencia fundamental del cronómetro, el cual se conecta a un contador de frecuencias para realizar la medición.

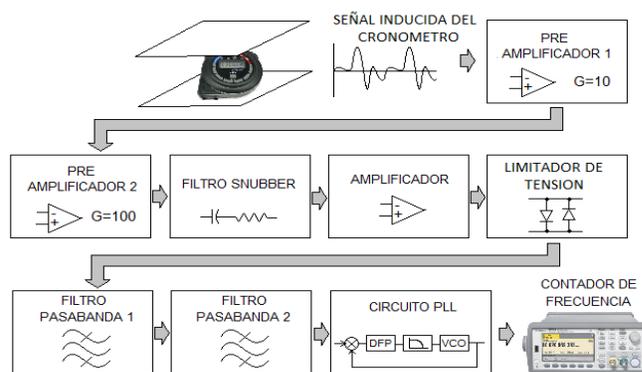


Figura 1. Diagrama del sistema detector de frecuencia.

Para evitar la interferencia del campo magnético del transformador que compone la fuente de alimentación del sistema detector de frecuencia se coloca ésta fuera de las cajas metálicas. Se utiliza una fuente externa de  $\pm 8$  V, la cual se encuentra separada del sistema de medición (ver Figura 2).

### III. SISTEMA DE MEDICIÓN

En el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia de INACAL se distribuye una señal de 5 MHz proporcionada por nuestro oscilador de Cesio Symmetricom 5071A. Este patrón pertenece a la red virtual "SIM Time Network" [6], la cual es una red de comparaciones continuas de diversos osciladores patrones de los países del Sistema Interamericano de Metrología (SIM). Gracias a esta herramienta obtenemos trazabilidad válida al Tiempo Universal Coordinado (UTC) a través de NIST, CENAM, NRC (INMs que participan en el "SIM Time Network" y que también contribuyen al mantenimiento del UTC). Esta frecuencia patrón es utilizada para mejorar la base de tiempo de nuestros equipos.

El sistema de medición está compuesto por un sistema detector de frecuencia, un contador de frecuencias y una computadora para realizar las mediciones en forma automática. El contador de frecuencias Agilent 53220A se encuentra conectado por referencia externa a la frecuencia patrón del laboratorio obteniendo trazabilidad válida al UTC. La computadora debe ser tal que permita realizar mediciones con un gran número de muestras y sea compatible con el software a utilizar. Para realizar la captura de datos del contador de frecuencias utilizamos el software “Visor Soft”, el cual se desarrolló en el Laboratorio de Tiempo y Frecuencia de INACAL. También es posible utilizar un osciloscopio a la salida del sistema detector de frecuencias para observar la señal capturada. En la Figura 2 se muestra una foto del sistema de medición.

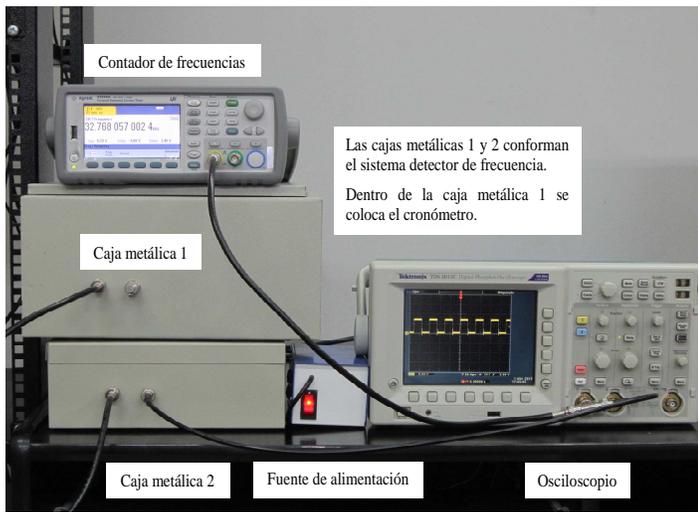


Figura 2. Foto del sistema de medición.

#### IV. ANALISIS DE DATOS

Para el tratamiento de los datos obtenidos con el sistema de medición utilizamos el software para el análisis de mediciones de frecuencia “AMTyF” [4]. Con el software AMTyF se obtiene la exactitud del oscilador en estudio en términos de la desviación fraccional de frecuencia ( $\overline{\Delta f/f_0}$ ) y su estabilidad en términos de la raíz de la varianza de Allan o desviación de Allan ( $\sigma_y(t)$ ) [5]. Para el estudio del oscilador del cronómetro se tiene la siguiente relación [2]:

$$f = \left( 1 + \frac{\overline{\Delta f}}{f_0} \pm 2 \times \sigma_y(t) \right) f_0 \quad (1)$$

donde:

- $f$ : es la frecuencia medida del cronómetro.
- $f_0$ : es la frecuencia nominal del cronómetro.
- $\overline{\Delta f/f_0}$ : es la desviación fraccional de frecuencia.

$\sigma_y(t)$ : es la desviación de Allan.

Es posible colocar una ecuación similar a (1) en función del tiempo [2] dada por:

$$t = \left( 1 + \frac{\overline{\Delta f}}{f_0} \pm 2 \times \sigma_y(t) \right) t_0 \quad (2)$$

donde:

- $t$ : es el tiempo que realmente mide el cronómetro.
- $t_0$ : es el tiempo que se desea medir con el cronómetro.

De (2) se desprende la siguiente ecuación para obtener el error del cronómetro en la medida del tiempo:

$$Error(s) = t - t_0 = t_0 \times \frac{\overline{\Delta f}}{f_0} \quad (3)$$

Debe tenerse en cuenta que la desviación de Allan ( $\sigma_y(t)$ ) incluye la incertidumbre asociada a cada medición individual. Esta incertidumbre es generada por el propio sistema de medición debida a diversos parámetros, incluyendo las componentes más importantes de la incertidumbre total.

#### V. CARACTERIZACIÓN DEL RUIDO DEL SISTEMA DETECTOR DE FRECUENCIA

El sistema detector de frecuencia debe ser caracterizado para poder evaluar el ruido del sistema de medición y su desempeño continuo, por tal motivo es necesario contar con un circuito que realice dicha verificación simulando ser el cronómetro a calibrar. Dicho circuito es simple y está conformado por una antena y un generador de frecuencias. Como antena se usa una resistencia de 10 k $\Omega$ , la cual se conecta al generador de frecuencias como carga, simulando así la frecuencia que se induce en el cronómetro. El generador de frecuencias Tektronix AFG3102 se encuentra conectado por referencia externa a la frecuencia patrón del laboratorio obteniendo trazabilidad válida al UTC. Para realizar la caracterización en el generador de frecuencias se selecciona una carga de 10 k $\Omega$  y se aplica una señal de 32 768 Hz en modo sinusoidal con una amplitud de 100 mV a través de la resistencia, la señal inducida es capturada y medida por el sistema detector de frecuencia, verificando así su funcionamiento y su inmunidad contra influencias externas.

Se cuenta con un historial de más de un año de datos realizando continuamente la caracterización del ruido del sistema detector de frecuencia, por lo cual hemos podido comprobar que su aporte de incertidumbre es  $\leq 3$  ns/s, el cual es un valor que no afecta en la medición debido a que es 1000 veces menor que la mejor exactitud de un cronómetro considerado actualmente como 3  $\mu$ s/s (0,0003 %).

Entonces es posible indicar que el sistema detector de frecuencia es el adecuado para realizar la calibración de cronómetros digitales por el método de inducción. En la Figura 3 se muestra la estabilidad obtenida en la caracterización del ruido del sistema detector de frecuencia en términos de la raíz de la varianza de Allan usando el software AMTyF, mostrando un valor máximo de alrededor de 1 ns/s, el cual es suficientemente pequeño respecto a un cronómetro de 3  $\mu$ s/s de exactitud.

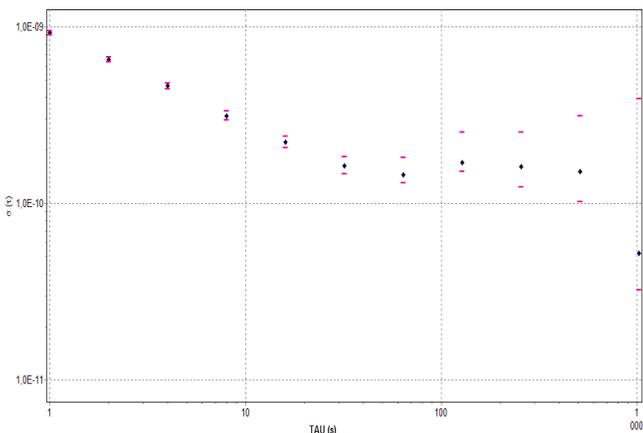


Figura 3. Caracterización del ruido del sistema detector de frecuencia en términos de la raíz de la varianza de Allan.

## VI. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SISTEMA DE MEDICIÓN

Para demostrar que el sistema de medición está trabajando adecuadamente se realizó la calibración de un cronómetro digital Traceable 1034 con resolución de 0,01 s utilizando el sistema de medición indicado en la referencia [2] y el sistema de medición descrito en el presente documento. Primero se realizó la medición de la frecuencia de la pantalla de refresco del LCD del cronómetro de 32 Hz [2] y luego se realizó la medición de la frecuencia fundamental del cronómetro de 32 768 Hz, en ambos casos la medición se realizó durante varios días obteniendo una cantidad suficiente de datos. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos en la medición de la frecuencia del cronómetro.

Frecuencia medida del cronómetro 32 Hz [2]		Frecuencia medida del cronómetro 32 768 Hz	
$\Delta f/f_0$ ( $\mu$ Hz/Hz)	$U$ ( $\mu$ s/s)	$\Delta f/f_0$ ( $\mu$ Hz/Hz)	$U$ ( $\mu$ s/s)
1,9	0,1	2,0	0,1

$\Delta f/f_0$ : Desviación fraccional de frecuencia.

$U$ : Incertidumbre de medición (con  $U = 2 \times \sigma_y(t)$ ).

Tabla 1. Resultados obtenidos en la medición de la frecuencia del cronómetro.

En la Tabla 1 se observa la desviación fraccional de frecuencia obtenida por ambos sistemas de medición son casi iguales y son compatibles dentro de las incertidumbres de medición alcanzadas por cada sistema de medición (0,1  $\mu$ s/s), obteniéndose el error del cronómetro en la medición del tiempo para ambos sistemas con valores similares y comparables. Entonces es válido indicar que el sistema de medición descrito en el presente documento es el adecuado para realizar la calibración de cronómetros digitales midiendo directamente la frecuencia fundamental del cronómetro con una incertidumbre de medición suficientemente menor respecto a un cronómetro de 3  $\mu$ s/s de exactitud.

## VII. CONCLUSIONES

Este trabajo muestra que es posible calibrar cronómetros digitales por el método de inducción sin necesidad de abrir el cronómetro, midiendo directamente la frecuencia fundamental del oscilador de cuarzo del cronómetro con una incertidumbre de medición  $\leq 0,1 \mu$ s/s, la cual es 30 veces menor que la de un cronómetro de 3  $\mu$ s/s de exactitud.

## VIII. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Grupo de Trabajo de Tiempo y Frecuencia de la Región SIM “SIM Time and Frequency Metrology Working Group” por sus diversos aportes y constante apoyo en la realización de este trabajo, en especial a los INMs de Costa Rica, México y USA.

## REFERENCIAS

- [1] Gust, Jeff C.; Graham, Robert M.; Lombardi, Michael A. Practice guide “Stopwatch and Timer Calibrations” (2009 Edition). NIST. Special Publication 960-12.
- [2] Henry Diaz, Henry Postigo. Calibración de cronómetros digitales por el método de inducción con una incertidumbre de medición  $\leq 0,1 \mu$ s/s. SNM-INDECOPI. Perú. X Semetro.
- [3] Johnny Jiménez, Harold Sánchez. Calibración de cronómetros mediante la medición de la frecuencia del oscilador de cuarzo. ICE. Costa Rica. VIII Semetro.
- [4] Francisco J. Jiménez Tapia. CENAM. AMTyF Software (Análisis de Mediciones de Tiempo y Frecuencia). Descarga del software en la página web SIM Time and Frequency Metrology Working Group. <http://tf.nist.gov/sim/papers.htm>.
- [5] CENAM – ema. Guía técnica sobre trazabilidad e incertidumbre en la metrología de tiempo y frecuencia. México. Abril 2008. Revisión 01.
- [6] SIM Time Network. This page allows you to view the results of time and frequency comparisons between members of the Interamerican Metrology System (SIM) [http://gps.nist.gov/scripts/sim\\_rx\\_grid.exe](http://gps.nist.gov/scripts/sim_rx_grid.exe).